

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПЯТНООБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЕ

© 2023 г. Ю. А. Наговицын^{1,2*}, А. А. Осипова¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 20.04.2023 г.

После доработки 21.06.2023 г.; принята к публикации 11.08.2023 г.

Рассмотрены экстремальные уровни солнечной активности на временных шкалах 300–400 и 9000 лет. Суммарная площадь солнечных пятен AR — физический индекс активности Солнца — оценена с помощью реконструкции числа солнечных пятен, полученной в работе Ву и др. (Astron. Astrophys. 615, A93, 2018). Основное исследование проведено именно в терминах этого индекса. Изменения солнечной активности в эпоху последних 300–400 лет достаточно хорошо представляют ее изменения на временах порядка девяти тысячелетий. Максимальный уровень солнечной активности для среднегодовых значений составил $AR_M = 2930 \pm 400$ м.д.п. (миллионных долей полусферы). Верхний предел для суточных значений составил $AR_M = 7500 \pm 2200$ м.д.п. для традиционных площадей пятен, скорректированных за перспективное искажение, и $AR_{OM} = 11\,400 \pm 3300$ м.д.п. (миллионных долей диска Солнца) для так называемых “наблюдаемых” площадей — проекций пятен на видимый диск Солнца. Оценены также максимальные среднегодовые значения чисел пятен $SN_M = 258 \pm 38$ и чисел групп пятен $GN_M = 12.3 \pm 2.4$; 11.3% времени солнечная активность находится на экстремально высоком уровне; 8.5% времени ее уровень соответствует минимуму Дальтона и ниже и 4.5% — крайне низкому. Таким образом, для солнечной активности более вероятны экстремально высокие уровни, чем экстремально низкие.

Ключевые слова: солнечная активность, солнечные пятна.

DOI: 10.31857/S0320010823070033, EDN: YCUARY

ВВЕДЕНИЕ

Солнце — переменная звезда, и эта переменность представляет непосредственный интерес для звездной астрономии, поскольку Солнце является ближайшей к нам космической лабораторией по проверке теорий строения, магнитного поля и активности звезд. Разброс солнечной активности от Маундеровского минимума (вторая половина XVII в.) до современного максимума второй половины XX в. достаточно мал по сравнению со звездами солнечного типа — колебания общего солнечного излучения (total solar irradiance) не превышают нескольких десятых процента (Фрелих, 2006), в то время как переменность звезд в некоторых случаях может достигать нескольких процентов (Бердюгина, 2005). Рейнхольд и др. (2020) объединили данные миссий Kepler и Gaia, чтобы показать, что Солнце, по-видимому, в среднем в пять раз менее переменно, чем звезды с известными

фундаментальными параметрами и периодами вращения, близкими к солнечным. При рассмотрении параметра суммарной площади пятен AR различие сохраняется — максимальное значение этого параметра на Солнце наблюдалось в 18-м цикле солнечной активности, и по данным RGO была равна 8382 м.д.п. (миллионных долей полусферы Солнца)¹, в то время как средняя оценка площади пятен молодых аналогов Солнца на порядок больше (см., например, Саванов, 2022). Заметим, что анализ большого числа данных позволил по независимым определениям переменности блеска подтвердить заключение о повышенной запятненности поверхности звезд с супервспышками (Саванов, 2015).

Существование звезд, в основном идентичных Солнцу, но обладающих значительно более мощной и регулярной переменностью, может означать, что Солнце со временем может переходить в режимы

* Электронный адрес: nag-yury@yandex.ru

¹ https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/daily_area.txt

высокой активности и выходить из них (Копп, Шапиро, 2021, и ссылки в этой работе).

После проведения таких параллелей возникает вопрос: возможно ли по имеющимся историческим данным о солнечной активности оценить теоретически возможный ее верхний предел? Эта информация важна не только в фундаментальном плане, но и для прикладных задач — экстремальные события на Солнце типа события Кэррингтона (Кэррингтон, 1859), если они произойдут сейчас, могут нанести существенный урон космическим кораблям на орбите, электрическим сетям, спутниковой связи, глобальной навигации вплоть до потери спутников вследствие неблагоприятных изменений физических свойств верхних слоев атмосферы, ионосферы и магнитосферы Земли (Шрайвер и др., 2015).

Отдельным пунктом важно отметить, что интерес представляют не только максимальные периоды солнечной активности, но и минимальные, поскольку они связаны с усилением потока галактических космических лучей (Хатавей, 2015). Они, в свою очередь, влияют на климат Земли и могут представлять опасность для здоровья людей (Кристалл и др., 2004; Свенсмарк, 2007; Сингх и др., 2011). Частота наступления грандиозных минимумов типа Маундеровского в будущем пока не определена (Гершберг, 2015, с. 518). Заметим здесь, что хотя исследователи чаще всего в качестве эталонно-глубокого минимума выбирают Маундеровский, по ряду оценок (Огурцов, 2019) минимум Шперера в XV—XVI вв. был более глубоким.

Один из важных вопросов: насколько наши оценки, сделанные в период с начала прямых наблюдений 400 лет назад, репрезентативны для длительных интервалов времени, скажем, с начала голоцена: на 10 000-летней временной шкале.

Один из возможных подходов к решению этой проблемы — теория экстремальных значений, которая использует данные об уже имеющихся экстремальных событиях, и с помощью статистических методов пытается предсказать вероятность событий, превышающих по экстремальности ранее наблюдаемые. Рамос (2007) применил эту теорию к версии числа Вольфа 1.0 и нашел максимальное возможное его значение ~ 324 , а частоту максимумов солнечной активности типа 19 цикла не менее 50 лет с наиболее вероятным интервалом повторения ~ 700 лет. Ацери и др. (2017) провели подобный анализ для версии чисел Вольфа 2.0 и показали, что число Вольфа не может превысить значение, равное 528. Ацери и др. (2018) с использованием реконструкций на основе данных о космогенных изотопах на масштабе $\sim 10\,000$ лет показали, что самые высокие экстремальные значения солнечной активности были достигнуты в прошлом и, как ожидается, не будут превышены в будущем.

Виллис, Тулунай (1979) нашли, что максимально возможная усредненная за оборот общая площадь солнечных пятен не может превышать 7293 м.д.п.

Также возможным подходом является приближение имеющегося распределения параметров солнечной активности различными распределениями для оценки верхнего предела (Клайвер и др., 2022). Гопалсвами (2018) применил этот подход к общей площади групп солнечных пятен с 1874 по 2016 г. (RGO + SOON): с использованием степенного распределения он получил максимальное значение площадей = 13 600 м.д.п.

Усоскин и др. (2014) показали на основе ~ 3000 -летнего ряда реконструкции чисел Вольфа на основе космогенных изотопов бимодальность статистического распределения солнечной активности, где периоды максимальной активности Солнца соответствуют уровню активности, наблюдавшейся в период 19–23 циклов.

Задача нашей работы — прояснить некоторые вопросы, касающиеся экстремальной активности Солнца с несколько иным подходом, чем у других авторов, и уточнить оценки ее уровней на длительной (порядка 10 000 лет) временной шкале. Сначала мы найдем максимальные значения индексов активности в период телескопических наблюдений с оценкой их неопределенностей, а затем сравним полученные результаты с длительным радионуклидным рядом Ву и др. (2018).

ИНДЕКС ЧИСЛА ПЯТЕН SN И ОЦЕНКА ЕГО ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА

Правило Вальдмайера или эффект Вальдмайера (1935) связывает время развития цикла с его амплитудой: чем меньше длина ветви роста, тем выше цикл в максимуме. Коэффициент корреляции R не очень велик: около 0.8 для разных индексов и формулировок этого правила.

Дмитриева и др. (2000) в рамках тестирования подхода асимптотической теории динамо рассмотрели некоторые зависимости в 11-летнем цикле между поведением числа Вольфа, называемого ныне числом пятен SN (версии 1.0), на ветви роста и величиной максимума. В частности, была отмечена *линейная* корреляция между максимальной производной SN'_M и максимальным в цикле значением SN_M :

$$SN_M = 32.68 + 19.23 \times SN'_M, \quad R = 0.95. \quad (1)$$

Использовались 12-месячные сглаженные значения. Обратим внимание: полученная регрессия имела значимый ненулевой свободный член. Линейные регрессии, подобные (1), были получены также Осиповой и Наговицыным (2017) в контексте концепции двух популяций пятен (Наговицын и

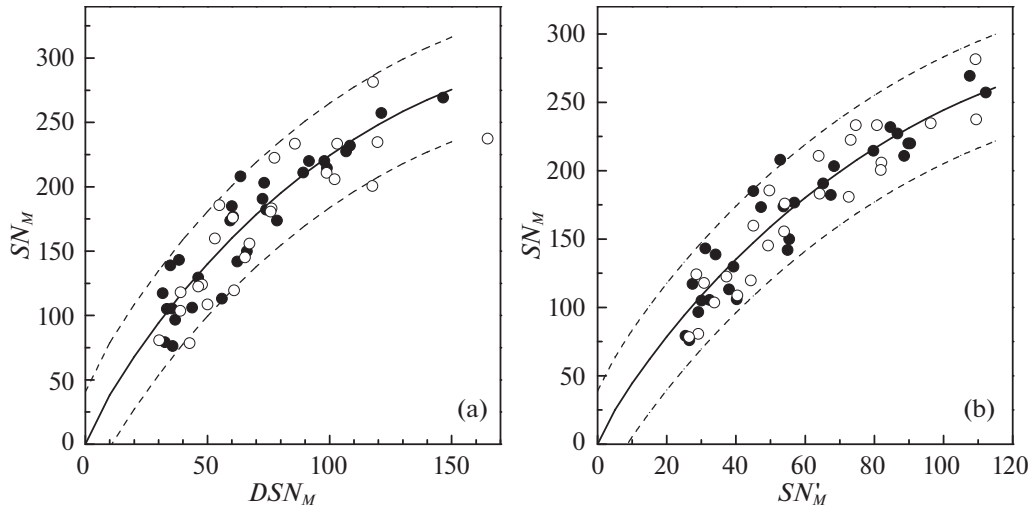


Рис. 1. Зависимость максимума среднегодовых чисел пятен SN_M в 11-летнем цикле от максимальной левой производной на ветви роста цикла DSN_M (а); максимальной производной на ветви роста цикла SN'_M (б). Сплошные линии — средние аппроксимирующие кривые $SN_M = \tilde{f}(DSN_M)$ (а) и $SN_M = \tilde{f}(SN'_M)$ (б). Черные кружки — среднегодовые числа пятен с января по декабрь, светлые — с июля по июнь следующего года. Пунктиры ограничивают области удвоенного среднеквадратического отклонения регрессий. Временной интервал — с 1749 г. по наше время.

др., 2012; Наговицын, Певцов, 2016; Наговицын и др., 2018).

В работах Наговицына и Кулешовой (2012), Наговицына и др. (2015) рассматривалась зависимость среднегодовых SN_M от максимального значения $DSN_M \equiv SN_i - SN_{i-1}$ (т.е. максимальной левой численной производной в i -м году) на ветви роста цикла с целью ранней диагностики максимума. Было обращено внимание, что аппроксимационная кривая должна проходить через начало координат, поскольку из общих соображений при “вырожденном” цикле с $SN_M = 0$ максимальное DSN_M тоже равно нулю. При этом зависимость $SN_M = f(DSN_M)$ становится *нелинейной*, и в формулу вида (1) был добавлен еще один (квадратический) член. Далее, в статье Наговицына и др. (2015) было показано, что зависимость становится не только нелинейной, но и ограниченной сверху. Для версии 1.0 получено выражение, которое в наших обозначениях выглядит так:

$$SN_M = (3.23 \pm 0.12)DSN_M - (1.52 \pm 0.18) \times 10^{-2}DSN_M^2, \quad R = 0.93. \quad (2)$$

Обратим внимание: корреляция зависимости лучше, чем в классическом правиле Вальдмайера. В статье Наговицына и др. (2015) было отмечено также, что среднегодовые величины SN , начиная с 1749 г., можно вычислять не только традиционным способом с января по декабрь, но и со сдвигом на полгода: с июля по июнь следующего года. Это позволяет увеличить плотность экспериментальных точек и визуализировать их разброс. Построим зависимость вида (2) для SN версии 2.0, которая

принята после 2016 г. в качестве основной (Клетте и др., 2014). Для поиска коэффициентов зависимости применим метод, предложенный Левенбергом (1944) и Марквардтом (1963), позволяющий аккуратно работать с нелинейными зависимостями. Будем использовать только независимые точки рис. 1 — среднегодовые значения, вычисленные с января по декабрь. Регрессионная зависимость выглядит так:

$$SN_M = (3.30 \pm 0.16)DSN_M - (1.03 \pm 0.16) \times 10^{-2}DSN_M^2, \quad R = 0.93. \quad (3)$$

Здесь σ — среднеквадратическое отклонение. Далее, мы хотим наилучшим образом аппроксимировать зависимость $SN_M = f(DSN_M)$ для значений экспериментального ряда SN на его временном промежутке 1749–2023 гг. Как мы видим из рис. 1а, значения SN_M зависят от способа суммирования среднемесячных (например, отличие для крайних справа черного и светлого кружков составляет 32 единицы SN). Поэтому для адекватной оценки максимального среднегодового SN_M на всем интервале 1749–2023 гг. мы должны применить подход доверительных интервалов. В этой работе мы будем использовать в их качестве удвоенное среднеквадратическое отклонение от аппроксимирующей кривой, имея в виду, что экспериментальные точки попадают в данные интервалы с вероятностью $p = 0.95$.

Теперь заметим, что, вообще говоря, существуют и другие по сравнению с (3) формы — тоже двухпараметрических — зависимостей, которые

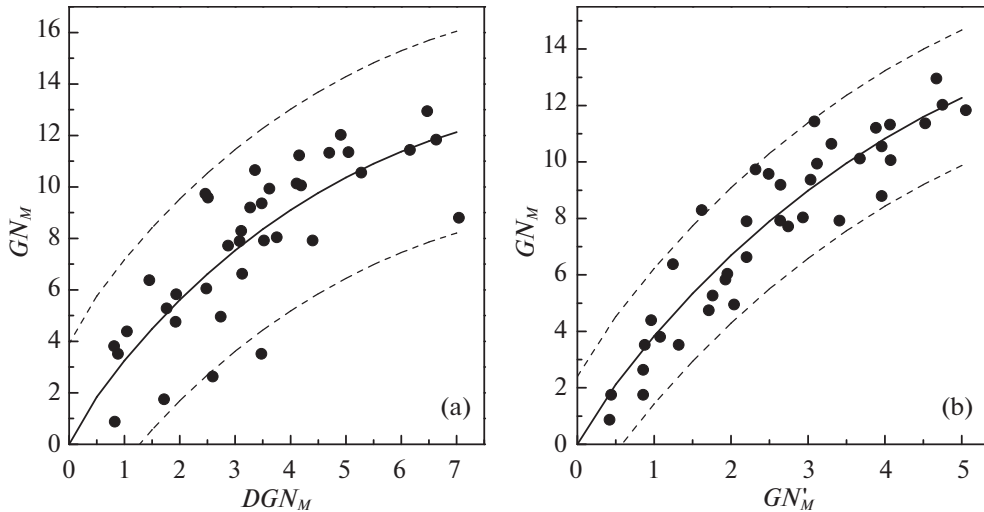


Рис. 2. Зависимость максимума среднегодовых чисел групп пятен GN_M в 11-летнем цикле от максимальной левой производной на ветви роста цикла DGN_M (a); максимальной производной на ветви роста цикла GN'_M (b). Сплошные линии — средние аппроксимирующие кривые $GN_M = \tilde{f}(DGN_M)$ (a) и $GN_M = \tilde{f}(GN'_M)$ (b). Пунктиры ограничивают области удвоенного среднеквадратического отклонения регрессий. Временной интервал — с 1610 по 2015 г.

можно использовать. В частности, это — степенная функция и так называемая функция Бокса—Лукаса (Бокс, Лукас, 1959). Вычисление коэффициентов методом Левенберга—Марквардта дает соответствующие выражения:

$$SN_M = (10.6 \pm 2.5) DSN_M^{(0.661 \pm 0.053)}, \quad (4)$$

$$\sigma = 20.1, \quad R = 0.93,$$

$$SN_M = (344 \pm 41) \times (5)$$

$$\times \left[1 - e^{-(10.5 \pm 2.0) \times 10^{-3} DSN_M} \right],$$

$$\sigma = 19.5, \quad R = 0.93.$$

Мы видим, что среднеквадратические отклонения (3)–(5) с точностью до двух значащих цифр (Агемян, 1972) совпадают, коэффициенты корреляции тоже. Таким образом, три разные двухпараметрические формы одинаково “удачно” аппроксимируют экспериментальную зависимость. Коэффициенты корреляции между SN_M , рассчитанными по (3)–(5), для наблюдаемых абсцисс составили для пары (3) и (4) $R(3, 4) = 0.991$, для других комбинаций: $R(3, 5) = 0.999$, $R(4, 5) = 0.996$. Поэтому для дальнейших аппроксимаций и оценок можно было бы использовать одну из зависимостей, но мы решили использовать среднюю кривую, которую мы будем обозначать далее \tilde{f} , полученную усреднением (3)–(5) и изображенную на рис. 1а. По ней мы получаем оценку максимального значения числа Вольфа на промежутке 1749–2023 г. (с учетом вероятности $p = 0.95$): $SN_M^* = 270 \pm 39$.

В качестве приложения к описанному выше, можно предложить по наблюдаемому в текущем

цикле значению $DSN_M = 53.6$ прогноз приближающегося максимума 25-го 11-летнего цикла: 147 ± 39 ($p = 0.95$), который не противоречит, в частности, прогнозу Наговицына и Иванова (2023): 136 ± 25 .

Рассмотрим теперь зависимость SN_M от максимального значения численной собственно производной $SN'_M \equiv (SN_{i+1} - SN_{i-1})/2$. Проделаем точно те же процедуры аппроксимаций, как и в предыдущем случае. Для того чтобы избежать излишнего объема изложения, мы не будем далее приводить формул, подобных (3)–(5), ограничившись полученными результатами. На рис. 1b приведена сводная кривая и соответствующие доверительные пределы. Коэффициент корреляции $R = 0.94$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 18.8$, оценка максимума $SN_M^* = 258 \pm 38$. Таким образом, SN'_M лучше (хотя и немного) описывает максимальные SN_M , чем DSN_M . Поэтому вывод этого раздела: с округлением до десятков верхний предел среднегодового числа солнечных пятен, оцениваемый по 270-летнему промежутку, составляет для версии 2.0 $SN = 300$ (вероятность $p = 0.95$).

ИНДЕКС ЧИСЛА ГРУПП ПЯТЕН GN И ОЦЕНКА ЕГО ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА

Индекс числа групп пятен GSN был введен Хойтом и Шаттенем (1998). В настоящее время имеется несколько рядов — версий этого индекса, который сейчас чаще обозначается GN и не нормируется на SN , как это делали Хойт и Шаттен. Ряды приведены в работах Свальгаарда и

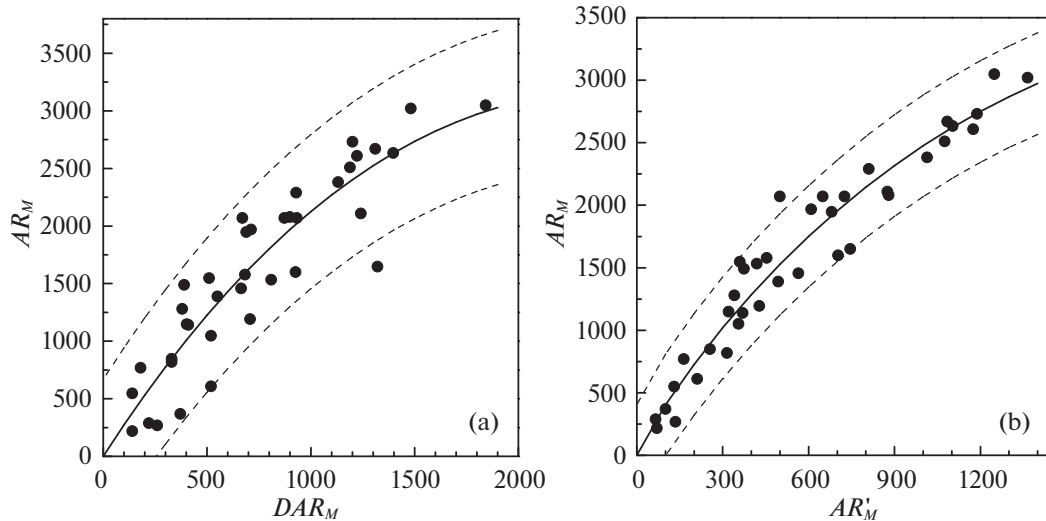


Рис. 3. Зависимость максимума среднегодовых площадей групп пятен AR_M в 11-летнем цикле от максимальной левой производной на ветви роста цикла DAR_M (a); максимальной производной на ветви роста цикла AR'_M (b). Сплошные линии — средние аппроксимирующие кривые $AR_M = \tilde{f}(DAR_M)$ (a) и $AR_M = \tilde{f}(AR'_M)$ (b). Пунктиры ограничивают область удвоенного среднеквадратического отклонения регрессий. Временной интервал — с 1610 по 2022 г.

Шаттена (2016), Усоскина и др. (2016), Клайвера и Линга (2016), и Хаджистергоса и др. (2017). Наиболее продолжительным, включающим низкую активность второй половины XVII в., является первый из них.

Как и в предыдущем разделе, сопоставим максимальные в циклах значения GN_M для этого ряда с максимальным годовым приростом активности DGN_M (рис. 2a) и с максимальной производной GN'_M (рис. 2b), проделав процедуры подобно тому, как это делалось для SN . Получено: для $GN_M = \tilde{f}(DGN_M)$ $R = 0.81$, $\sigma = 1.91$; для $GN_M = \tilde{f}(GN'_M)$ $R = 0.93$, $\sigma = 1.17$. Заметим, сравнивая коэффициенты корреляции, что первое соотношение значительно менее надежно, чем второе. Это может быть следствием того факта, что индекс GN весьма чувствителен к разрешению используемого инструмента (Наговицын, Георгиева, 2017; Карачик и др., 2019), и при объединении наблюдений разного качества в единый ряд возможны случайные ошибки.

Из рис. 2b и вычислений получаем оценку максимального числа групп $GN_M^* = 12.3 \pm 2.4$ с верхним пределом на 400-летнем промежутке $GN = 14.7$ (вероятность $p = 0.95$).

В конце раздела добавим, что мы строили зависимости, подобные (3)–(5), и для других рядов индекса GN , однако они не отметились чем-то отличающимся коренным образом от ряда Свальгаарда и Шаттена, и мы их в статье не приводим.

ИНДЕКС СУММАРНОЙ ПЛОЩАДИ ГРУПП ПЯТЕН AR И ОЦЕНКА ЕГО ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА ДЛЯ 400-ЛЕТНЕЙ ШКАЛЫ

В нашей статье (Наговицын, Осипова, 2021) предложена 410-летняя реконструкция ряда среднегодовых площадей пятен AR в гринвичской системе. Отметим, что именно AR является наиболее интересующим нас индексом по двум причинам: во-первых, из трех индексов солнечной активности только он связан с физической величиной — генерируемым динамо магнитным потоком (Наговицын и др., 2016, 2017; Пипин и др., 2023), а во-вторых, звездная циклическая магнитная активность измеряется именно запятненностью — площадью звездных пятен, и, следовательно, именно в терминах индекса AR проводятся солнечно-звездные аналогии при рассмотрении Солнца как ближайшей к нам космической лаборатории (Холл и др., 2009; Саванов, 2015; Дмитриенко, Саванов, 2022 и др.).

Построим зависимости, аналогичные рассмотренным выше для чисел пятен и групп пятен (рис. 3a,b). На нем и последующих рисунках единицы измерений площади являются традиционными — м.д.п.

Было получено для $AR_M = \tilde{f}(DAR_M)$: $R = 0.91$, $\sigma = 327$; для $AR_M = \tilde{f}(AR'_M)$: $R = 0.97$, $\sigma = 198$. Поскольку вторая зависимость оказывается гораздо более надежной, по ней оцениваем: $AR_M^* = 2930 \pm 400$, и верхний предел максимального значения среднегодовой площади солнечных

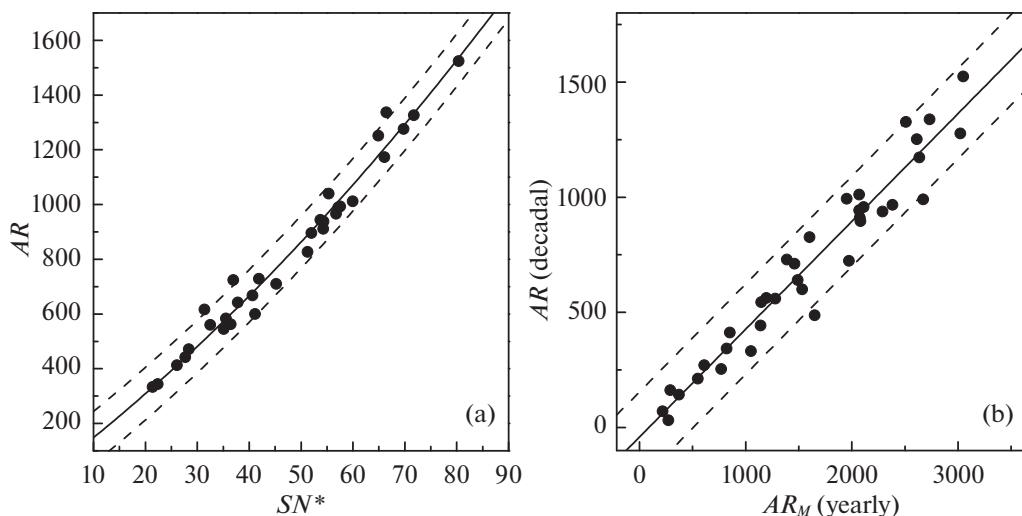


Рис. 4. (а) — Сопоставление шкал реконструкций площадей солнечных пятен AR и SN^* по (6). (б) — Сопоставление суммарных площадей пятен для декадных AR и максимальных среднегодовых значений AR_M в данную декаду. Пунктиры ограничивают удвоенное среднеквадратическое отклонение регрессий.

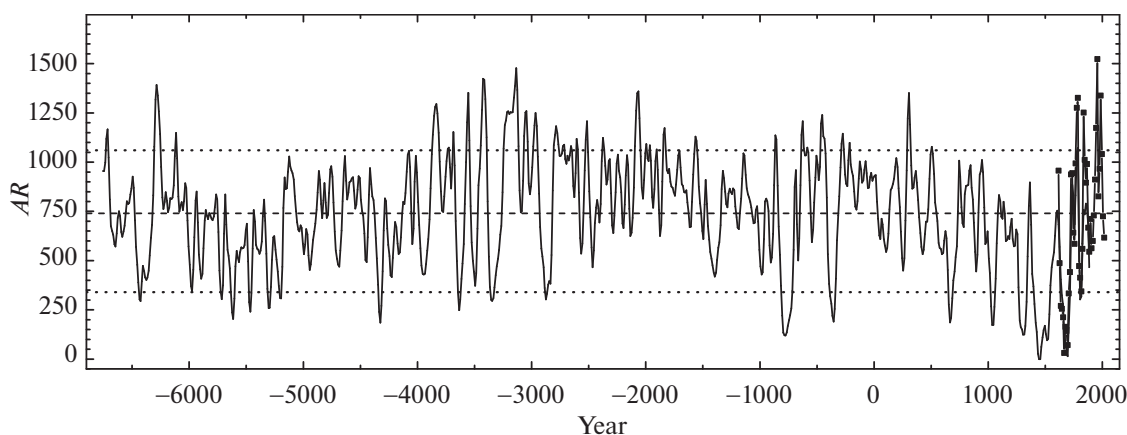


Рис. 5. Изменение среднедекадных площадей солнечных пятен AR с 6755 г. до н.э. по наше время на основе шкалирования (6) радионуклидной реконструкции по Ву и др. (2018) — сплошная линия, и на основе ряда Наговицына и Осиповой (2021) — сплошная линия + квадраты. Точечные линии — референтные пределы для глобальных максимумов и минимумов. Пунктир — среднее значение за все время.

пятен на интервале 1610–2022 гг. составит $AR_M = 3330$ м.д.п. с вероятностью $p = 0.95$.

МАКСИМАЛЬНАЯ ПЛОЩАДЬ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В ПОСЛЕДНИЕ 9000 ЛЕТ

В работе Ву и др. (2018) приведена современная декадная реконструкция солнечной активности на временном интервале 9000 лет, полученная на основе радионуклидных данных о концентрации ^{14}C и ^{10}Be в природных архивах — кольцах деревьев и полярных льдах. Модуляционный потенциал — параметр, получаемый по радионуклидным данным — преобразован в шкалу версии 2.0 SN , умноженную на 0.6 (детали содержатся в оригинальной работе).

Нас интересует параметр площади пятен (запятненность солнечного диска). Образум из среднегодовых значений декадные $SN^* \equiv 0.6 \times SN^2$ и максимальные AR в данную декаду по ряду Наговицына и Осиповой (2021) и сопоставим их (рис. 4а). Формула перехода

$$AR = (14.21 \pm 0.72)SN^* + (6.1 \pm 1.2) \times 10^{-2}(SN^*)^2, \quad R = 0.99. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции — высокий, хотя и имеется слабая, но значимая, нелинейность. Применяя формулу (6) к результатам Ву и др. (2018),

²https://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt

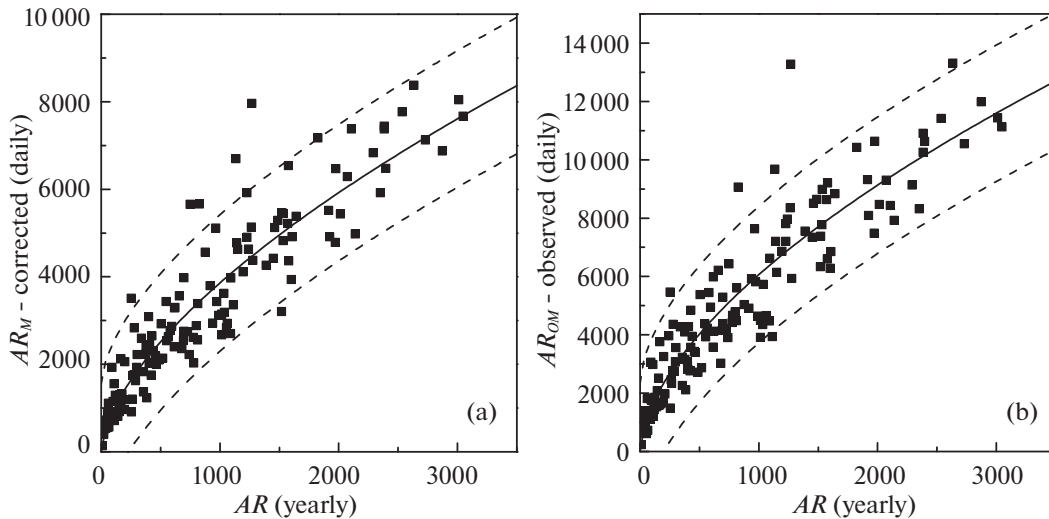


Рис. 6. (a) — Сопоставление максимальных за год суточных площадей солнечных пятен AR_M со средними в данном году AR ; (b) — то же, но для так называемых наблюдаемых суточных площадей AR_{OM} (пояснение см. текст). Пунктиры ограничивают области удвоенного среднеквадратического отклонения регрессий.

получаем 9000-летнюю реконструкцию декадных значений площадей солнечных пятен (рис. 5).

Основная интересующая нас особенность рис. 5 — максимальные площади радионуклидной реконструкции в седьмом и четвертом тысячелетии до н.э. соответствуют значениям в современную инструментальную эпоху, и мы можем принять экстремально высокие AR солнечной активности на 9-тысячелетнем интервале на основе оценок, полученных в предыдущих разделах.

До этого момента мы говорили о данных, усредненных за избранные интервалы времени. Рассмотрим экстремальные суточные данные. Воспользовавшись данными Мандала и др. (2020) и Кисловодской Горной станции ГАО РАН, сопоставим на интервале наблюдений в гринвичской системе максимальные суточные площади солнечных пятен в избранном году со среднегодовыми в нем же (см. рис. 6) в двух вариантах: для так называемых наблюдаемых площадей (т.е. проекций пятен на видимый диск Солнца, в м.д.д. — в миллионных долях диска) AR_O и площадей, скорректированных за перспективное сокращение — собственно обычно используемых AR . Результаты приведены на рис. 6 и соответствуют формулам, полученным с помощью метода Левенберга–Марквардта:

$$AR_M [day] = (55 \pm 11) \times AR_M [year]^{(0.618 \pm 0.027)}, \quad R = 0.93, \quad (7)$$

$$AR_{OM} [day] = (103 \pm 19) AR_M \times [year]^{(0.590 \pm 0.026)}, \quad R = 0.93. \quad (8)$$

Отсюда получаем наиболее вероятные оценки максимальных суточных значений AR (статистические

оценки, как и прежде, соответствуют удвоенному среднеквадратическому отклонению или вероятности $p = 0.95$)

$$\begin{aligned} AR_M &= 7500 \pm 2200 \text{ м.д.п.}, \\ AR_{OM} &= 11\,400 \pm 3300 \text{ м.д.д.} \end{aligned} \quad (9)$$

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В этой статье мы рассмотрели экстремально высокие уровни солнечной активности на временных шкалах 300–400 и 9000 лет.

Мы уточнили максимальные среднедекадные, среднегодовые и суточные значения площадей солнечных пятен для магнитной активности Солнца. Кроме того, оценены максимальные среднегодовые значения чисел пятен $SN_M = 258 \pm 38$ и чисел групп пятен $GN_M = 12.3 \pm 2.4$. Верхний предел суточных значений составил по (9) порядка 10 000 м.д.п. для площадей пятен, скорректированных за перспективное сокращение, и порядка 15 000 м.д.д. — для наблюдаемых.

В качестве практического приложения предложен прогноз предстоящего максимума 25-го 11-летнего цикла: 147 ± 39 ($p = 0.95$), близкий к значениям других авторов.

Возникает вопрос: как часто Солнце находится в состоянии экстремальной — как максимальной, так и минимальной — активности? Это можно оценить по рис. 3–5.

По величине $AR_M^* = 2930 \pm 400$, найденной раньше, получаем нижний статистический предел для среднегодовых максимумов — $AR_M = 2530$ м.д.п. По рис. 4b определяем, что этому значению соответствует $AR_M \approx 1060$ м.д.п. для

декадных значений (верхняя точечная прямая на рис. 5). В результате вычисления показывают, что 11.3% времени солнечная активность находится на экстремально высоком уровне. Оценки наиболее вероятных максимальных суточных значений (9) приведены в конце предыдущего раздела.

Рассмотрим также и экстремально низкие значения солнечной активности. В контексте влияния на Землю не только повышенной активности оказывает негативное действие из-за учащающихся крупных вспышечных процессов, связанных с запятненностью, но и, наоборот, пониженная активность может негативно влиять на планету. А именно, во время пониженной солнечной активности галактические космические лучи, состоящие главным образом из высокоэнергичных протонов и ядер гелия, из-за “слабой” гелиосферы активно бомбардируют атмосферу Земли и оказывают влияние на климат (Кристл и др., 2004; Свенсмарк, 2007; Сингх и др., 2011 и др. работы). Рассмотрим низкие уровни солнечной активности (рис. 5). Беспрецедентным здесь является период с середины XV по конец XVII в. н.э. Это так называемые грандиозные минимумы Шперера и Маундера. Кроме того, для периода телескопических наблюдений мы знаем о меньшем, но достаточно глубоко, минимуме Дальтона — начало XIX в. Выберем этот уровень в качестве референтного $AR_M = 340$ м.д.п. для декадных значений и рассчитаем частотность годов, когда на 9000-летней шкале солнечная активность была ниже. Оказывается, что такие эпизоды составляют 8.5% времени. Можно также рассчитать процент длительности экстремально низких значений солнечной активности, исходя из принимаемого в работе Усокина и др. (2007) уровня $SN = 15$. По уравнению (6) это дает $SN = 230$ м.д.п., и тогда общая продолжительность низких уровней активности составит всего 4.5%, что близко к оценкам, которые вытекают из работы Усокина и др. (2007) для принимаемой модели геомагнитного дипольного момента Кортэ и Констебла (2005). Таким образом, для солнечной активности, как это следует из реконструкции AR , приведенной на рис. 5, более вероятны экстремально высокие уровни, чем экстремально низкие.

Еще одним важным результатом этой работы является приведение реконструкции Ву и др. (2018) в шкалу физического индекса — суммарной площади солнечных пятен, близкого к индексу пятенного магнитного потока (Наговицын и др., 2016; Наговицын и др., 2017), и подтверждение вслед за результатами статьи Ву и др. (2018) вывода, что изменения солнечной активности в эпоху последних 300–400 лет достаточно хорошо представляют ее изменения на временном периоде порядка десятка тысячелетий. Надеемся, что длительный ряд в этой

шкале поможет в будущем продвинуться в понимании связей Солнце—земной климат и, с другой стороны, в рассмотрении физических механизмов влияния на экзопланеты магнитной активности родительских звезд, рассматривая Солнечную систему как ближайшую к нам космическую лабораторию.

Авторы благодарят Мировой центр данных SILSO (Королевская обсерватория, Бельгия, Брюссель) за открытую политику использования данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агекян Т.А., *Основы теории ошибок для астрономов и физиков* (М.: Наука, 1972), 172 с.
2. Ацерио и др. (F.J. Acero, M.C. Gallego, J.A. García, I.G. Usoskin, and J.M. Vaquero), *Astrophys. J.* **853**, id. 80 (2018).
3. Ацерио и др. (F.J. Acero, V.M.S. Carrasco, M.C. Gallego, J.A. García, and J.M. Vaquero), *Astrophys. J.* **839**, id. 98 (2017).
4. Бердюгина (S.V. Berdyugina), *Liv. Rev. Solar. Phys.* **2**, 8 (2005).
5. Бокс, Лукас (G.E. Box and H.L. Lucas), *Biometrika*, **46**, 77 (1959).
6. Вальдмайер (M. Waldmeier), *Astron. Mitt. Eidgenoss. Sternwarte Zürich* **14**, 105 (1935).
7. Виллис, Тулунай (D.M. Willis and Y.K. Tulunay), *Solar Phys.* **64**, 237 (1979).
8. Ву и др. (C.J. Wu, I.G. Usoskin, N. Krivova, G.A. Kovaltsov, M. Baroni, E. Bard, and S.K. Solanki), *Astron. Astrophys.* **615**, A93 (2018).
9. Гершберг Р.Е., *Активность солнечного типа звезд главной последовательности* (Симферополь: ООО “Антиква”, 2015), 614 с.
10. Гопалсвами (N. Gopalswamy), *Extreme events in geospace* (Ed. N. Buzulukova, Elsevier: 2018), p. 37.
11. Дмитриева и др. (I.V. Dmitrieva, K.M. Kuzanyan, and V.N. Obridko), *Solar Phys.* **195**, 209 (2000).
12. Дмитриенко, Саванов (E.S. Dmitrienko and I.S. Savanov), *Astron. Lett.* **48**, 676 (2022).
13. Карачик и др. (N.V. Karachik, A.A. Pevtsov, and Yu.A. Nagovitsyn), *MNRAS* **488**, 3804.
14. Кацова и др. (M.M. Katsova, V.N. Obridko, D.D. Sokoloff, and I.M. Livshits), *Astrophys. J.* **936**, 49 (2022).
15. Клайвер и др. (E.W. Cliver, C.J. Schrijver, K. Shibata, and I.G. Usoskin), *Liv. Rev. Solar. Phys.* **19**, id.2 (2022).
16. Клайвер, Линг (E.W. Cliver and A.G. Ling), *Solar Phys.* **291**, 2763 (2016).
17. Клетте и др. (F. Clette, L. Svalgaard, J.M. Vaquero, and E.W. Cliver), *Space Sci. Rev.* **186**, 35 (2014).
18. Копп, Шапиро (G. Kopp and A. Shapiro), *Solar Phys.* **296**, 60 (2021).
19. Кортэ, Констебл (M. Korte and C.G. Constable), *Earth Planet. Sci. Lett.* **236**, 348 (2005).
20. Кристл и др. (M. Christl, A. Mangini, S. Holzkamper, and C. Spotl), *J. Atmosph. Solar-Terrest. Phys.* **66**, 313 (2004).

21. Кэррингтон (R.C. Carrington), *MNRAS* **20**, 13 (1859).
22. Левенберг (K. Levenberg), *Quart. Appl. Math.* **2**, 164 (1944).
23. Маквардт (D. Marquardt), *SIAM J. Appl. Math.* **11**, 431 (1963).
24. Мандал и др. (S. Mandal, N.A. Krivova, S.K. Solanki, N. Sinha, and D. Banerjee), *Astron. Astrophys.* **640**, id. A78 (2020).
25. Наговицын, Георгиева (Yu.A. Nagovitsyn and K. Georgieva), *Geomagn. Aeron.* **57**, 783 (2017).
26. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova, and V.G. Ivanov), *Geomagn. Aeron.* **58**, 1170 (2018).
27. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), *Astron. Nachr.* **338**, 26 (2017).
28. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and W.C. Livingston), *Astrophys. J. Lett.* **758**, id L20 (2012).
29. Наговицын и др. (Yu.A. Nagovitsyn, V.N. Obridko, and A.I. Kuleshova), *Solar Phys.* **290**, 1285 (2015).
30. Наговицын и др., *Astron. Lett.* **42**, 773 (2016) [Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova, A.G. Tlatov, E.V. Miletskii, and E.Yu. Nagovitsyna, *Astron. Lett.* **42**, 703 (2016)].
31. Наговицын, Иванов (Yu.A. Nagovitsyn, V.G. Ivanov), *Solar Phys.* **298**, 37 (2023).
32. Наговицын, Осипова (Yu.A. Nagovitsyn and A.A. Osipova), *MNRAS* **505**, 1206 (2021).
33. Наговицын, Певцов (Yu.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys. J.* **833**, id. 94 (2016).
34. Наговицын Ю.А., Кулешова А.И., *Астрон. журн.* **89**, 883 (2012) [Yu.A. Nagovitsyn, A.I. Kuleshova, *Astron. Rep.* **56**, 800 (2012)].
35. Огурцов (M.G. Ogurtsov), *Adv. Space Res.* **64**, 1112 (2019).
36. Осипова, Наговицын (A.A. Osipova and Yu.A. Nagovitsyn), *Geomagn. Aeron.* **57**, 1092 (2017).
37. Пипин и др. (V.V. Pipin, A.G. Kosovichev, V.E. Tomin), *Astrophys. J.* **949**, id. 7 (2023).
38. Рамос (A.A. Ramos), *Astron. Astrophys.* **472**, 293 (2007).
39. Рейнхольд (T. Reinhold, A.I. Shapiro, S.K. Solanki, B.T. Montet, N.A. Krivova, R.H. Cameron, and E.M. Amazo-Gómez), *Science* **368** (6490), 518 (2020).
40. Саванов (I.S. Savanov), *Astron. Lett.* **48**, 267 (2022).
41. Саванов (I.S. Savanov), *Astrophys. Bull.* **70**, 83 (2015).
42. Саванов И.С., *Астрофиз. Бюлл.* **70**, 308 (2015) [I.S. Savanov, *Astrophys. Bull.* **70**, 292 (2015)].
43. Свальгаард, Шаттен (L. Svalgaard and K.H. Schatten), *Solar Phys.* **291**, 2653 (2016).
44. Свенсмарк (H. Svensmark), *Astron. Geophys.* **48**, 1.18 (2007).
45. Сингх и др. (A.K. Singh, D. Siingh, and R.P. Singh), *Atmospheric Environment* **45**, 3806 (2011).
46. Усоскин и др. (I.G. Usoskin, S.K. Solanki, and G.A. Kovaltsov), *Astron. Astrophys.* **471**, 301 (2007).
47. Усоскин и др. (I.G. Usoskin, G. Hulot, Y. Gallet, R. Roth, A. Licht, F. Joos, G.A. Kovaltsov, E. Thébault, and A. Khokhlov), *Astron. Astrophys.* **562**, L10 (2014).
48. Усоскин и др. (I.G. Usoskin, G.A. Kovaltsov, M. Lockwood, K. Mursula, M. Owens, and S.K. Solanki), *Solar Phys.* **291**, 2685 (2016).
49. Фрелих (C. Fröhlich), *Space Sci. Rev.* **125**, 53 (2006).
50. Хаджистергос и др. (T. Chatzistergos, I.G. Usoskin, G.A. Kovaltsov, N.A. Krivova, and S.K. Solanki), *Astron. Astrophys.* **602**, A69 (2017).
51. Хатавей (D.H. Hathaway), *Liv. Rev. Solar. Phys.* **12**, id. 4 (2015).
52. Хойт, Шаттен (D.V. Hoyt and K.H. Schatten), *Solar Phys.* **179**, 189 (1998).
53. Холл и др. (J.C. Hall, M.S. Giampapa, G.W. Henry, J.L. Lean, S.H. Saar, and D.R. Soderblom), *Astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey*, *Science White Papers*, **111** (2009).
54. Шрайвер и др. (C.J. Schrijver, K. Kauristie, A.D. Aylward, C.M. Denardini, S.E. Gibson, A. Glover, N. Gopalswamy, M. Grande, et al.), *Adv. Space Res.* **55**, 2745 (2015).
55. https://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt
56. https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch/daily_area.txt